

# 실시간 무선 센서 네트워크에서 IEEE 802.15.4 클러스터 트리 기반의 토폴로지 최적화에 관한 연구

박명곤<sup>o</sup> 김강욱 이창건<sup>+</sup>

서울대학교

mgpark@rubis.snu.ac.kr, kwkim@rubis.snu.ac.kr, cglee@snu.ac.kr

## A Study on Optimizing IEEE 802.15.4 Cluster-Tree Topology for Real-Time Wireless Sensor Networks

Myung-Gon Park<sup>o</sup> Kang-Wook Kim Chang-Gun Lee<sup>+</sup>

The School of Science and Engineering, Seoul National University

### 요 약

IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크는 표적 추적, 재난 관리 등의 실시간 시스템 구축을 위한 기술로써 그 수요가 증가하고 있다. 전체 네트워크의 수명을 최대화하기 위해서 네트워크 토폴로지, 각 노드의 Beacon Interval(BI)과 Superframe Duration(SD), 그리고 송신 출력을 고려해야한다. 본 논문에서는 클러스터 트리 기반의 IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크에서 실시간성 데이터의 종단간 데드라인을 결정적으로 보장하고 각 노드의 전력 소모량을 줄여 전체 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 고려해야할 파라미터를 소개하고 이에 대해 논의한다.

### 1. 서 론

최근 몇 년간 무선 네트워킹의 수요가 급격히 증대하였다. 지금까지의 무선 네트워킹은 주로 높은 데이터 전송율과 상대적으로 넓은 전송 범위에 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔다. 이러한 발전은 IEEE 802.11 표준의 개발을 통해 명확히 알 수 있다. 초기의 IEEE 802.11 표준은 1-2 Mbps이었지만, 최근에 개발된 IEEE 802.11n은 300 Mbps의 데이터 전송률을 제공한다. 저비용, 고성능의 장치가 시장에 급증하고 새로운 응용 시스템이 개발되면서, 고전송률 및 전송률, 두 종류의 근거리 무선 네트워크(WPAN)가 출현하였다. UWB이라 불리는 IEEE 802.15.3a와 LR-WPAN이라 불리는 IEEE 802.15.4가 각각 고전송률과 저전송률을 지원하는 근거리 무선 네트워크에 해당한다. 저전송률의 무선 네트워크는 상대적으로 관심을 받지 못하고 있었지만 이러한 시스템이 덜 중요하다는 것을 의미하지 않는다. IEEE 802.15.4는 Wi-Fi와 UWB 등의 무선 표준을 보완할 수 있는 표준이며, 사실상 저전송률 무선 네트워크는 고전송률의 무선 네트워크 보다 우리 일상생활에 더욱 밀접한 관계를 가지고 있다. 즉, IEEE 802.15.4는 저전송률, 저전력, 저비용, 자기조직화, 적응적 토폴로지 등 다른

무선 표준과 차별화된 특징을 가지고 있으며, 이러한 특성은 주로 자동화 및 제어, 모니터링, 상황 인지와 위치 추적에 활용된다[1, 2].

일상생활과 밀접한 무선 네트워크 시스템은 위험방지나 인명구조에 주로 활용된다. 하지만 대다수의 위험방지 및 인명구조 시스템은 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 그 이유로는 첫째, 넓은 범위의 센서를 배치하기에는 너무 복잡하거나 비용이 많이 든다. 둘째, 급격한 배터리 고갈로 인해 작동이 자주 멈추기 때문이다. IEEE 802.15.4는 이러한 문제를 상당 부분 해결하였지만, 두 가지 측면에서 개선해야할 사항이 여전히 존재한다. 첫째, 개별 노드의 배터리 수명은 수 개월 또는 수 년에 달하지만, 실제 네트워크 토폴로지의 구성에 따라 특정 노드의 무선 전송과 데이터 수신에 집중되고, 이로 인해 전체 네트워크의 수명은 짧아지게 된다. 둘째, 위험방지 및 인명구조 등의 시스템은 주로 실시간성 데이터 패킷을 주고 받는다. 하지만 IEEE 802.15.4는 낮은 전송률을 가진 무선 네트워크이기 때문에 데이터의 종단간 전송 딜레이에 의해 치명적인 문제를 초래할 수 있다. 따라서 네트워크 토폴로지를 어떻게 결정하느냐에 따라 무선 전력의 사용을 최소화, 전체 네트워크의 수명을 극대화, 그리고 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인의 결정적 보장을 가능하게 한다.

대규모의 무선 센서 네트워크에서 야기되는 복잡성 문제와 전력 소모를 줄이기 위해 클러스터링 기반의 네트워크 토폴로지 연구가 활발히 진행되고 있다[6, 9, 10]. LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 무선 센서 네트워크에서 전체 네트워크의 수명을 증대시키기 위한 대표적인 클러스터링 기반의 프로토콜 중

+ 교신 저자

\* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [KI001824, 장애인 및 고령자를 위한 Digital Guardian 기술개발]

\* 이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터연구소에 감사 드립니다.

하나이다[3]. LEACH 프로토콜은 주기적으로 배터리 잔량을 고려하여 클러스터 헤드를 노드 중에서 선택함으로써, 베이스 스테이션과 통신할 때 소비되는 높은 에너지를 센서 네트워크 내의 모든 노드에게로 분산 시킨다. 하지만 LEACH 프로토콜은 하나의 베이스 스테이션으로 데이터가 수집되는 형태의 네트워크만을 고려하였으며, 노드 간의 실시간성 데이터 패킷과 종단간 데드라인을 고려하지 않았다. IEEE 802.15.4에서 실시간 데이터 패킷의 종단간 데드라인을 결정적으로 보장하고 전체 네트워크의 수명을 증대시키기 위해 각 노드의 beacon interval(BI)과 superframe duration(SD)을 결정하는 알고리즘에 대한 연구가 있다[5, 7]. 하지만 네트워크 토폴로지는 이미 결정된 것으로 가정하였으며, 노드간의 거리와 각 노드의 송신 출력은 고려하지 않았다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 클러스터 트리 기반의 무선 센서 네트워크 토폴로지를 구성할 때, 전체 네트워크의 수명을 최대화하는 동시에 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인을 결정적으로 보장하기 위해 어떤 파라미터를 고려해야 하는지 소개하고 이에 대해 논의한다. 이를 통해 각 노드의 수명과 전체 네트워크의 수명을 증대시키는 동시에 데이터 패킷의 실시간성을 보장할 수 있는 클러스터 트리 네트워크 구성 및 각 노드의 송신 전력을 결정하기 위한 목적 함수 및 알고리즘을 정의할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.15.4 프로토콜을 소개하며, 클러스터 트리 기반 무선 센서 네트워크의 적합성을 설명한다. 3장에서는 문제를 서술하고 클러스터 트리 토폴로지 최적화를 위한 파라미터와 제약조건을 정의한다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. IEEE 802.15.4 프로토콜 개요

IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜은 PAN 코디네이터라 불리는 중앙 노드에 의해 두 가지 동작 모드를 지원한다. non beacon-enabled mode는 non-slotted CSMA/CA MAC 프로토콜을 사용하며, beacon-enabled mode는 자신의 근거리 네트워크를 식별하고 참가한 노드와 동기를 맞추기 위해 주기적으로 비컨 신호를 보낸다. Beacon-enabled mode는 네트워크의 timeliness를 제공하기 때문에, 본 논문에서는 실시간성 데이터 패킷을 결정적으로 보장하기 위해 beacon-enabled mode만을 고려한다.

Beacon-enabled mode에서 Beacon Interval(BI)는 두 비컨 사이의 시간을 정의하며, 통신이 이루어지는 활동 구간(active period)과 전력 절감을 위한 휴면 구간(inactive period)으로 나누어진다. 활동 구간은 superframe이라 불리며 16개의 동일한 타임 슬롯으로 분할된다. 휴면 구간이 존재할 경우, 모든 노드들은 전력 소모를 줄이기 위해 휴면 모드로 전환된다. 그림 1은 Beacon Interval과 superframe의 구조를 나타낸다.

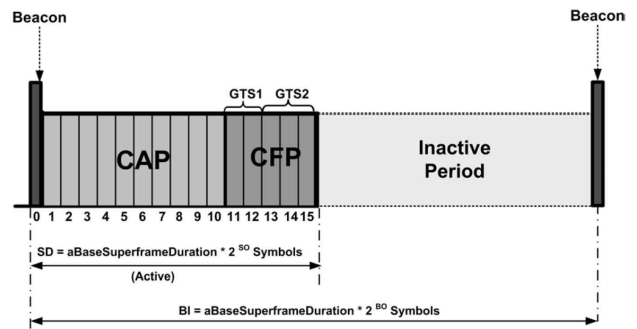


그림 1. Beacon Interval과 superframe의 구조

Beacon Interval과 Superframe Duration(SD)은 각각 Beacon Order(BO)와 Superframe Order(SO) 파라미터에 의해 결정된다. Beacon Interval은 아래와 같이 정의된다:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \text{ for } 0 \leq BO \leq 14.$$

활동 구간의 길이를 결정하는 SD은 아래와 같이 정의된다:

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \text{ for } 0 \leq SO \leq 14.$$

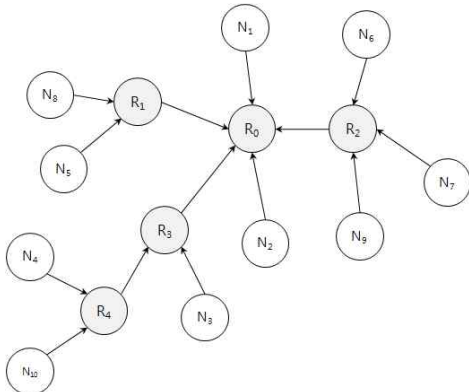
위의 수식에서 aBaseSuperframeDuration은 superframe의 최소 길이를 나타낸다. IEEE 802.15.4 표준에서 해당 구간을 960 symbol로 고정하였으며, 한 symbol은 4 bit를 표현한다. 또한, 2.4 GHz의 주파수 대역, 250 kbps의 전송률일 때 해당 구간은 15.36 ms의 시간으로 정의된다.

기본적으로 모든 노드는 SD 내의 Contention Access Period(CAP) 구간에서 slotted CSMA/CA를 사용하여 전송 경쟁을 한다. 또한, IEEE 802.15.4는 superframe 내에서 Contention-Free Period(CFP)을 가질 수 있는 가능성을 선택적으로 제공한다. CFP는 노드가 PAN 코디네이터에 타임 슬롯 할당을 요청함으로써 활성화된다. PAN 코디네이터는 이러한 요청을 받으면 자원이 충분한지 판단하여, 가능할 경우 요청된 타임 슬롯을 할당한다. 이러한 타임 슬롯을 Guaranteed Time Slots(GTSs)라고 부르며 CFP를 구성한다. 만약 자원이 충분하지 않으면 GTS 요청은 실패하게 되고, 해당 노드는 CAP 구간에 데이터 패킷을 전송한다. 따라서 GTS를 통해 실시간성 데이터 패킷을 전송하면 네트워크 토폴로지에 따른 종단간 최악지연시간을 계산할 수 있으며, 효율적인 GTS 할당을 통해 종단간 데드라인을 결정적으로 보장할 수 있는 토폴로지 설계가 가능하다.

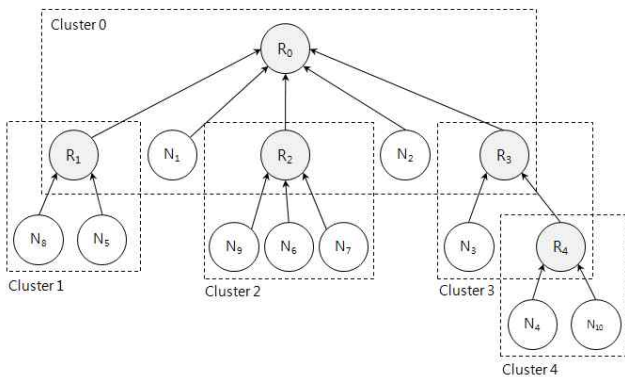
IEEE 802.15.4는 beacon-enabled mode에서 클러스터 트리 네트워크를 지원한다. IEEE 802.15.4 클러스터 트리 네트워크는 하나의 PAN 코디네이터, 다수의 라우터와 종단 장치로 구성된다. 기본적으로 PAN 코디네이터와 라우터는 동일한 역할을 수행하므로 두 장치 모두 라우터라고 부르기로 한다. 클러스터 트리 네트워크의 실제 노드 배치 및 논리적인 클러스터 트리의 구조는 그

림 2와 같다.

클러스터 트리 기반의 무선 센서 네트워크는 토폴로지가 결정된 이후 종단 장치간의 라우팅 경로는 트리 구성 형태에 의해 결정 때문에 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인 보장과 전체 네트워크 수명 최대화 문제로 축소할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 beacon-enable mode의 클러스터 트리 네트워크에서 GTS 방식을 사용하기로 한다.



(a) IEEE 802.15.4 네트워크 (실제 노드 배치)



(b) IEEE 802.15.4 네트워크 (논리적 클러스터 트리)

그림 2. IEEE 802.15.4 클러스터 트리 네트워크

### 3. 클러스터 트리 기반의 네트워크 토폴로지 최적화

#### 3.1 문제 서술

클러스터 트리 기반의 무선 센서 네트워크 토폴로지를 결정하기 전에 각 노드들의 위치 정보와 실시간성 데이터 패킷의 정의가 필요하다. 노드의 집합  $V$ 와 통신 링크의 집합인  $E$ 는 그래프  $G = (V, E)$ 로 표현할 수 있다. 토폴로지 구성의 결과는 트리 형태가 되며 구성 가능한 모든 클러스터 트리 네트워크  $N$ 에 대해  $N \subseteq E$ 를 만족한다. 노드  $i$ 와  $j$ 간의 거리는  $d_{ij}$ 로 정의한다. 실시간성 데이터 패킷은 주기적이라고 가정하며, 주기적은  $n$ 개의 데이터 패킷 흐름  $f$ 는 아래와 같이 정의한다:

$$f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}.$$

각각의 데이터 패킷 흐름  $f_i$ 은 아래와 같이 5개의 속성

을 가진다:

$$f_i = (src_i, dst_i, p_i, b_i, D_i),$$

여기에서  $src_i, dst_i, p_i, b_i, D_i$ 는 각각 전송 노드, 수신 노드, 데이터 패킷의 주기, 데이터 패킷의 사이즈, 종단간 데드라인을 의미한다.

다음 절에서는 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인 보장과 전체 네트워크 수명 최대화하기 위해 고려해야 할 파라미터를 소개한다.

#### 3.2 클러스터 트리

전체 네트워크의 전력 소모를 최소화하기 위한 가장 중요한 파라미터는 클러스터 트리의 구조이다. 데이터 패킷의 전송 노드와 수신 노드가 결정된 상태에서 클러스터 트리를 어떻게 결정하느냐에 따라 데이터 패킷 흐름이 특정 통신 링크에 집중이 되거나, 여러 통신 링크에 분산시킬 수 있다. 특정 통신 링크에 데이터 패킷 흐름이 집중될 경우, 양쪽 두 노드가 사용하는 송수신 전력 소모량은 다른 노드들에 비해 증가하고 가장 먼저 잔류 에너지가 고갈되어 전체 네트워크의 수명이 단축된다. 하지만 데이터 패킷의 흐름을 균등하게 분산시켰을 경우 각 노드의 잔류 에너지는 동일하게 소모되며, 동시에 전체 네트워크의 수명을 최대화할 수 있다.

노드와 통신 링크의 집합  $G = (V, E)$ 에 대해, 클러스터 트리 네트워크  $N$ 의 통신 링크 연결 유무는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\lambda_{ij}(N) = \begin{cases} 1: (i, j) \in N \\ 0: otherwise \end{cases}$$

여기에서  $i, j$ 는 노드를 의미한다. 노드  $i$ 와  $j$ 의 데이터 링크  $(i, j)$ 가 클러스터 트리 네트워크  $N$ 에 속할 경우 1을 나타내고, 그렇지 않을 경우 0을 나타낸다.

#### 3.3 송신 출력

IEEE 802.15.4는 최대 30 dBm까지 출력 조절이 가능하도록 FCC 표준에서 규정하였다. 송수신시 오류를 최소화하는 가장 고전적인 방법은 송신 출력을 최대화 하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 전력을 낭비하고, 다른 무선 장치에 간섭을 초래한다. 따라서 송신기 수신 감도와 노드간의 거리에 따라 통신이 가능한 최소한의 출력으로 송신을 수행하는 것이 가장 이상적이다. 클러스터 트리가 구성되면 통신 링크가 결정되고 각 노드의 최소 전송 출력값이 결정된다. 노드  $i$ 의 송신 출력은 아래와 같이 정의한다.

$$P = \{P_i | i \in V\}.$$

#### 3.4 비컨 스케줄링

노드가 전력을 소비하는 시간은 다른 노드의 데이터 패킷을 수신하는 자신의 SD 구간과 송신시 자신에게 할당된 이웃 노드의 GTS 구간이다. SD 구간의 길이에 비해 BI 구간의 길이가 길어질수록 휴면 구간이 길어지므로 전력 소모를 줄일 수 있다. 하지만 BI 구간이 너무 길어지면 실시간성 데이터 패킷의 종단간 지연이 커지게 되며 종단간 데드라인을 만족하지 못하게 된다. 따라서 BI, SD 구간의 길이와 각 노드에 할당될 GTS 구간의 길이를 어떻게 결정하느냐에 따라 전력 소모량을 최소화할 수 있다. 노드  $i$ 의 BI, SD 구간은 아래와 같이 정의한다.

$$BI = \{BI_i | i \in V\},$$

$$SD = \{SD_i | i \in V\}.$$

실제로 SD 구간의 길이는 이웃 노드에게 할당된 GTS 구간의 길이와 CAP의 합계와 같다. 따라서, SD 구간의 길이는 아래와 같이 표현 가능하다.

$$SD_i = CAP_i + \sum_{j=1}^n GTS_i^j,$$

여기에서  $GTS_i^j$ 는 노드  $i$ 가 노드  $j$ 의 데이터를 수신하기 위해 할당된 GTS 구간의 길이를 의미한다.

### 3.5 제약 조건

클러스터 트리 구성을 최적화하기 위한 파라미터를 결정하기 위해서는 몇가지 제약 조건이 존재한다. 첫째, 각 노드에 할당된 GTS 구간의 길이는 실시간성 데이터 패킷의 크기와 주기를 고려하여 아래의 수식을 만족하여야 한다:

$$GTS_i^j \geq \sum_{f_k \in \Gamma} \delta_{ij}(f_k) \cdot BI_i \text{ for } (i,j) \in N,$$

$$\delta_{ij}(f_k) = \begin{cases} \frac{(b_k/R)}{p_k} & : (i,j) \in F_k \\ 0 & : otherwise \end{cases},$$

$$F_k = \{(i,j) | \text{edges that } f_k \text{ contains}\}.$$

$F_k$ 는 데이터 패킷 흐름  $f_k$ 에 포함되는 노드들의 모든 통신 링크의 집합이며,  $\delta_{ij}(f_k)$ 는 노드  $i$ 와  $j$ 가 이웃이면 데이터 패킷의 전송시간과 주기의 비율을 나타낸다. 여기에서  $b_k$ 는 데이터 패킷 크기,  $R$ 는 데이터 전송율을 의미한다. 그리고 노드  $i$ 와  $j$ 가 이웃이 아닐 경우  $\delta_{ij}$ 는 0을 나타낸다. 이 값과  $BI_i$ 를 곱하면 노드  $i$ 의 BI 구간에서 데이터 패킷 흐름  $f_k$ 이 차지하는 최소한의 시간을 구할 수 있다. 그리고 해당 통신 링크를 점유하는 모든 데이터 패킷 흐름에 대한 수치를 모두 합산하면 노드  $i$ 가 노드  $j$ 를 위해 할당해야하는 GTS 구간 길이의 최소값을 구할 수 있다.

둘째, 비실시간성 데이터 패킷의 최소한의 서비스를

보장하기 위해 SD 구간의 길이는 아래의 수식을 만족해야 한다:

$$SD_i \geq \max(aMinCAPLength, B_{CAP}^{min} \cdot BI_i) + \sum_j^n GTS_i^j$$

for  $(i,j) \in N$ ,

여기에서,  $aMinCAPLength$ 는 440 symbol이며, 2.4 GHz 주파수 대역, 250 kbps 전송률일 때 7.04 ms의 시간으로 정의된다.  $B_{CAP}^{min}$ 는 실제 네트워크에서 요구되는 최소한의 CAP 구간 대역폭을 의미한다.

셋째, 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인을 보장하기 위해 아래의 수식을 만족해야한다:

$$WD_i \leq D_i \text{ for } f_i \in \Gamma,$$

여기에서  $WD_i$ 는 종단간 최악지연시간을 의미한다. 종단간 최악 지연시간은 홉당 최악지연시간의 합계와 같으며 아래와 같이 계산할 수 있다:

$$\begin{aligned} Worst\ Case\ One\ Hop\ Deley &= \max_q \omega_k(q) - (q-1)p_k \\ &= \max_q \left[ \frac{q \cdot b_k/R}{\frac{b_k/R}{p_k} \cdot BI_i} \right] \cdot BI_i - (q-1)p_k, \end{aligned}$$

여기에서  $\omega_k(q)$ 는 데이터 패킷 흐름  $f_k$ 에 대해,  $q$ 개의 패킷을 연속적으로 걸렸을 때 노드  $i$ 로 전송을 완료하기까지 소요되는 시간을 의미한다. 이 시간에  $q-1$ 개의 패킷이 발생하는 주기의 시간만큼을 제외하면  $q$ 번째 패킷을 보내기 위해 소요되는 시간을 구할 수 있다. 이 값이 최대가 되는 값이 홉당 최악지연시간이라 할 수 있다.

넷째, IEEE 802.15.4에서 노드에서 할당가능한 GTS의 개수는 최대 7개로 제한되어 있다. 따라서, 해당 노드로 전송하는 노드는 7개 이하여야 하며 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{ij}(N) \leq 7 \text{ for } i,j \in V.$$

다섯째, 노드의 전송 출력은 통신 가능한 최소 출력 이상이 되어야 한다. 따라서 아래의 수식과 같이 자신과 가장 거리가 먼 이웃 노드와 통신이 가능하도록 전송 출력을 결정해야한다.

$$P_i - PL(\max_{d_{ij}} \lambda_{ij}(N)) \geq P_{min}^{recv} \text{ for } i,j \in V,$$

여기에서  $P_i$ 는 노드  $i$ 의 전송 출력,  $PL(\max_{d_{ij}} \lambda_{ij}(N))$ 은 노드  $i$ 와 이웃인 노드 중 가장 먼거리일 경우의 패스로스값,  $P_{min}^{recv}$ 는 최소 수신 전력값을 의미한다.

마지막으로, 모든 노드들의 SD 구간이 겹치지 않게 스케줄링이 가능해야 한다. 각 노드의 BI, SD 구간의 길이가 주어지면 스케줄 가능성 여부는 Koubaa가 제안한 알

고리즘을 통해 간단히 검사할 수 있다[5].

#### 4. 결론

본 논문에서는 클러스터 트리 기반의 IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크 토폴로지를 구성할 때 실시간성 데이터의 종단간 데드라인을 보장하고, 전체 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 네트워크 토폴로지 뿐만 아니라, 라우터 노드의 BI, SD 구간 길이와 송신 출력을 함께 고려해야함을 논의하였다. 네트워크 전체의 전력 소모를 줄이고 수명을 증대시키기 위한 연구가 진행되어 왔었지만, 실시간성 데이터 패킷의 종단간 데드라인을 동시에 보장하는 네트워크 토폴로지 설계에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지 않았다.

하지만, 이러한 파라미터를 고려해서 최적의 클러스터 트리를 구성하는 것은 여전히 해결해야할 문제로 남아있다. 따라서 본 논문에서 소개한 자유 변수와 제약 조건을 기반으로 최적의 클러스터 트리를 결정하기 위한 목적함수를 설계와 최적화 문제의 복잡도를 줄이기 위한 알고리즘 설계를 추후에 고려해 볼 것이다.

#### 참고문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, vol.40, no.8, 2002
- [2] J. Zheng and M. J. Lee, "Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?: A Discussion on a Potential Low Power, Low Bit Rate Standard," IEEE Communications Magazine, vol.27, no.6, 2004
- [3] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," IEEE International Conference on System Sciences, 2000
- [4] Y. Zhou, M. Hart, S. Vadgama, and A. Rouz, "A Hierarchical Clustering Method in Wireless Ad Hoc Sensor Networks," IEEE International Conference on Communications, 2007
- [5] A. Koubaa, A. Cunha, M. Alves, and E. Tovar, "A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks," Euromicro Conference on Real-Time Systems, 2007
- [6] H. M. N. D. Bandara and A. P. Jayasumana, "An Enhanced Top-Down Cluster and Cluster Tree Formation Algorithm for Wireless Sensor Networks," International Conference on Industrial and Information Systems, 2007
- [7] J. Han, "Global Optimization of ZigBee Parameters for End-to-End Deadline Guarantee of Real-Time Data," IEEE Sensors Journal, vol.9 no.5, 2009
- [8] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "GTS Allocation Analysis in IEEE 802.15.4 for Real-Time

Wireless Sensor Networks," International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2000

- [9] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "Modeling and Worst-Case Dimensioning of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks," IEEE International Real-Time System Symposium, 2006
- [10] F. Coumo, S. D. Luna, E. Cipollone, P. Todorova, and T. Suihko, "Topology Formation in IEEE 802.15.4: Cluster-Tree Characterization," IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2008